

# 環境に優しい薄肉ステンレス容器の絞り・しごき加工の開発

—ステンレス鋼絞り深絞り・しごき加工における塩素フリー潤滑油の性能評価試験—

名古屋工業大学大学院 つくり領域

准教授 北村憲彦

(平成18年度重点研究開発助成 AF-2006022)

キーワード：冷間加工，板成形，ステンレス鋼，潤滑，焼付き防止性能，塩素フリー，環境対応型

## 1. 研究の目的と背景

電池ケース，センサー用部品の耐久性や薄肉化に向けて，ステンレス鋼板の絞り・しごき加工が行われている。これは普通鋼板のプレス成形より潤滑条件が厳しいので，塩素系油剤が用いられることが多い。しかし生産現場での環境負荷低減を考えると，潤滑油の塩素フリー化は重要な課題<sup>1),2)</sup>である。本報では標準的なステンレス鋼の絞り・しごきの実機加工での板厚，硬さ，表面粗さを調べ，潤滑条件について整理する。次に数百個の連続加工試験にて幾つかの潤滑油の性能を調べる。その結果，塩素系油より塩素フリー試作油の焼付き防止性能は不十分ではあるが，おおむね反応活性のあるものが高い性能を示すことが分かった。実機評価は確実であるが，潤滑油の開発をするのは経済的とはいえず，結果の整理も大変である。そこで実機の条件をできるだけ考慮して，簡便で経済的に評価できる試験機を製作し，荷重や材料表面の傷から潤滑油の性能を評価した。

## 2. 実機試験における変形の特徴と潤滑性能

### 2-1 実機試験における材料変形の特徴

図1に加工したカップの外観写真を示す。被加工材は当初板厚0.25mm×φ40mmのSUS304L ( $Y=1450 \epsilon^{0.52}$  MPa)で，表面粗さは $0.9 \mu\text{mRz}$ である。本加工では第1工程(加工速度 $v=330 \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )で深絞りカップを成形し，その後，第2～12工程( $v=150 \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )で再絞り・しごき加工を行う。ダイス内径は第1工程，φ24.0から順に小さくし，最終12段目はφ4.02で，各ダイスとパンチとのクリアランスは約0.25程度である。ダイスは超硬にTiCNコーティングで約 $0.5 \mu\text{mRz}$ ，パンチはSKH51である。給油は第1，5，6，10，11工程前に行う。

図2に各段のカップ円筒部板厚分布を示す。第1，2段では絞り加工のみで，第3段以降でしごきを伴う。4段目は積極的にしごいていないが，5-9段にかけては，板厚の変化は小さく，再絞りで増加した板厚分をしごく程度で，

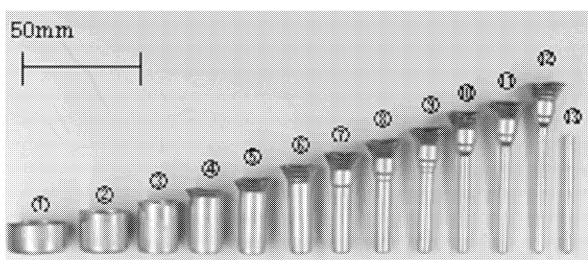


図1 実機試験した全12段絞り・しごき工程

板厚は0.25 mmにほぼ保たれている。最終12段では積極的にしごき，板厚0.24 mmにそろえている。

図3に各段の成形カップのビッカース硬さを示す。測定場所は，その段で成形したカップ円筒最上部の板厚中央部とした。図3で絞り段数0は加工前を意味する。加工前170HVであった材料は，加工が進むにつれて加工硬化し，最終的には450HVに硬化しており，通常の板成形より高面圧であり，摩擦条件も厳しいと考えられる。

図4にカップ外表面の表面粗さを測定した結果を示す。潤滑は従来から実用されている塩素系潤滑油である。第5工程のカップ上部で表面粗さが減少し，それ以降では中央部も減少し，第10工程では上部と中央で約 $1 \mu\text{m}$ ，底付近で $3 \sim 4 \mu\text{m}$ の表面粗さになる。最終12工程の上部・中央

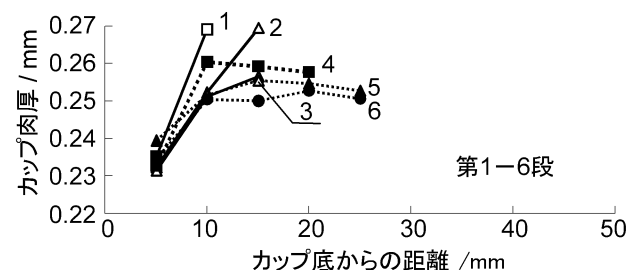
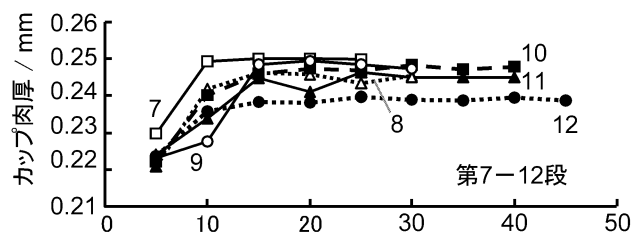


図2 各段ごとのカップ円筒部肉厚分布

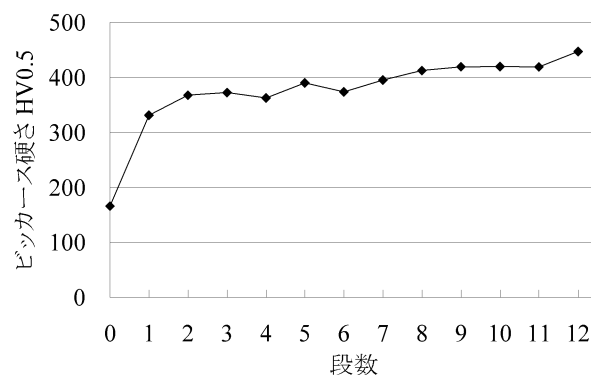


図3 各段のビッカース硬さ

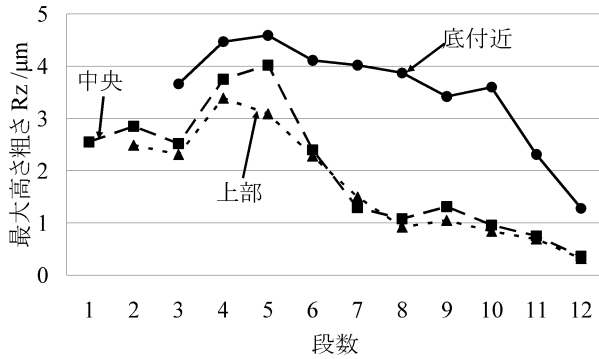


図4 各段のカップ外表面の表面粗さ

部では約 $0.5\mu\text{mRz}$ になり、ダイス表面粗さと同等になっている。底付近の表面粗さも第12工程では約 $1\mu\text{m}$ 程度に低下している。加工速度が $v=150\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ で、硬さが450HV、表面粗さから推測できる油膜厚さも $1\mu\text{m}$ 以下であるので、潤滑条件は相当に厳しいと推測される。

### 2・2 実機での潤滑の焼き防止性能

塩素系油剤と同じ工程で、塩素フリー潤滑油の性能試験を行った。表1に供試潤滑油の動粘度と代表的成分などを示す。比較としてAは塩素系潤滑油で、B~M（動粘度順に並べた）が試作潤滑油である。本試験では、1000個の連続加工を目標とし、製品表面に深い傷が多数発生した場合、またはダイスへの凝着が多くなった時点で試験を中断した。

図5に実機試験の結果を示す。図5中の $\Delta$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\times$ は12段目1個目のカップ上部の焼付きの程度を示す。傷が部分的で軽度なものを $\Delta$ 、部分的な深い縦筋状の傷と部分的なオイルピットが残存していたものを $\blacktriangle$ 、深い縦傷が多く、またオイルピットは残存せず鏡面化していたものを $\times$ 記号で区別した。潤滑油I,J,K,L,Mについては1個目から第12工程で激しい焼付き生じ、ダイスへのひどい凝着が発生したために試験を中断した。潤滑油B,C,Fは、加工始めから軽度な焼付きが見られたが、ある個数までは加工を続けることができ、Bでは250個加工で中断した。一方、潤滑油D,E,G,Hは比較的良好であり700個以上加工することができた。

図6に12段目1個目カップ表面（光学顕微鏡観察による）を示す。代表として潤滑油A（塩素系）、硫黄系潤滑油H,K（性能は高い順に $A>H>K$ ）について示す。塩素系の潤滑油Aでは12段目上部において、小さな細かい白い点が散在して見える。これらは小さなオイルピットと考えられる。一方、潤滑油Kではカップ中央部で軸方向に多数の深い傷が見られ、さらに上部には傷のない部分でオイルピットが消え、鏡面になっていた。比較的性能の良かった硫黄系潤滑油Hでは、上部において軽度の焼付きを生じているものの、傷のない部分には小さなオイルピットが散在していた。

### 2・3 試験片表面のEPMA分析

実機試験では添加剤配合油において、高粘度のものほど単純に性能が高いとはならなかった。これは粘度が性能に影響しないということの意味しては、粘度以外の潤滑油に含まれる添加剤などの化学的な効果も重要であると考えるのが自然である。今回の試作油には添加剤に含まれる金属塩類、界面活性剤、固体潤滑剤、エステルなどが配合され、それらによって化学吸着や化学反

表1 実機試験に供試した潤滑油

潤滑油	動粘度(40°C) / $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	主な成分系や含有元素
A	186	従来の塩素系油剤(SUS加工用)
B	91	硫黄系油剤+P+Ca+Zn
C	112	硫黄系油剤+P+Ca+Zn
D	130	硫黄系油剤
E	190	活性硫黄系油剤(SUS加工用)
F	194	油性剤+Ca+界面活性剤
G	195	活性硫黄系油剤+有機物
H	198	活性硫黄系油剤+固体潤滑剤
I	198	鉱油+油性剤+有機物
J	200	油脂硫黄系油剤
K	205	硫黄系油剤+Ca
L	207	不活性硫黄極圧剤
M	215	エステル系油性剤

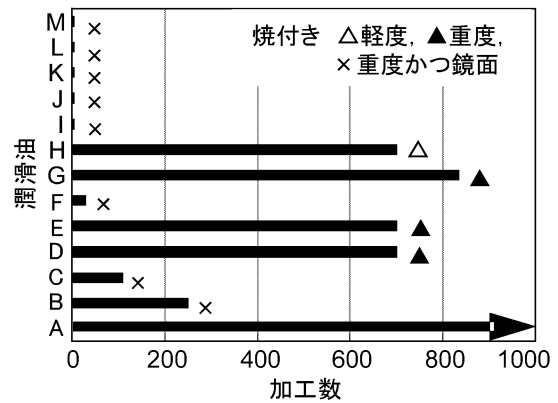


図5 焼付き限界加工数

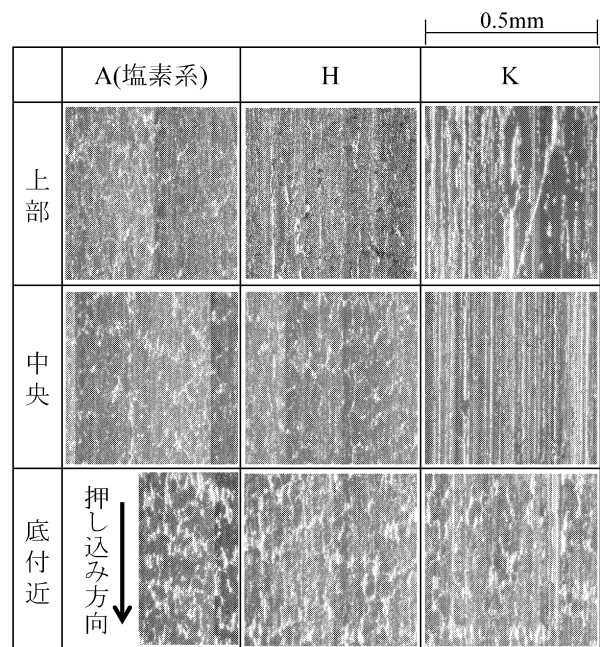


図6 カップ表面（第12工程の第1回目）

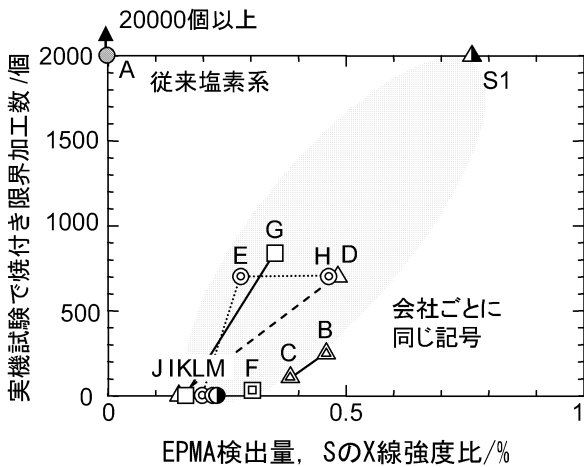


図7 試験片表面のEPMA分析と焼付き限界加工

応性を高めることで、性能を上げる狙いがある。試験片表面の反応生成物を試験後にEDXで検出しようと試みたが、かなり薄いか残存が少ないために検出できなかったためEPMAで分析した。図7に潤滑油含有の硫黄の反応活性と焼付き防止性能との関係を示す。潤滑油の反応活性の指標としては、第12段目の試験片表面についてEPMAにおける硫黄のX線強度比を測定した。硫黄のX線強度比は硫黄の反応活性が強いと硫黄に起因する反応物が多く検出される。各試験片とも連続試験開始の初期のもので、試験片の長さの中央部で測定した。焼付き防止性能は、実機試験の焼付き限界加工数でランク付けした。S1油は一部に実用され始めた非塩素系潤滑油とのことで、実機評価試験とEPMA分析を後から追加した。各潤滑メーカーから2-3種類の範囲で、活性度が違うと考えられるものが含まれている。それぞれで、硫黄の反応活性が高いほど性能が高くなる傾向が見られる。他にCaやNaなども調べてみたが、個別の反応量と焼付き防止性能との関係は単純に相関があるとはいえなかった。しかし、主要な反応物を助ける役割などもあるので、総合的な検討が必要と考える。

### 3. 成形管内面しごき試験機と性能評価結果

#### 3・1 成形管内面しごき試験機の製作と試験条件

標準的な条件の実機試験から得られる結果は貴重である。しかし、実生産の一部を活用して評価することは特別な場合を除いて、簡単に実現することではない。時間や経済的な制約から、評価対象潤滑油の数は限られ、結果の解析も難しい。一方、潤滑油の開発やメカニズムの解明のためには、多くの種類の潤滑とそれらの組合せを対象に評価試験<sup>3)</sup>をする必要がある。ここでは、前節の実機絞りしごき加工の条件を参考に、試験機を製作し、幾つかの潤滑油を評価した。図8(a)に製作した試験機の概観を示す。油圧とアキュムレータを組合せ、パンチ押込み速度は30 mm/sと230 mm/sである。荷重容量は約200 kNで、単発試験である。図8(b)は試験主要部で、図8(c)は本試験の原理を示す。ホルダーに入れた試験片内面を鋼球でしごき板厚を減少させる。ホルダー内径は11.67, 11.81, 11.90の3種類とし、鋼球は直径9.998と10.317 mmの2種類を組合せた。できるだけ潤滑良好な場合の結果からしごき率を求め、12, 16, 21%とした。荷重はパンチ

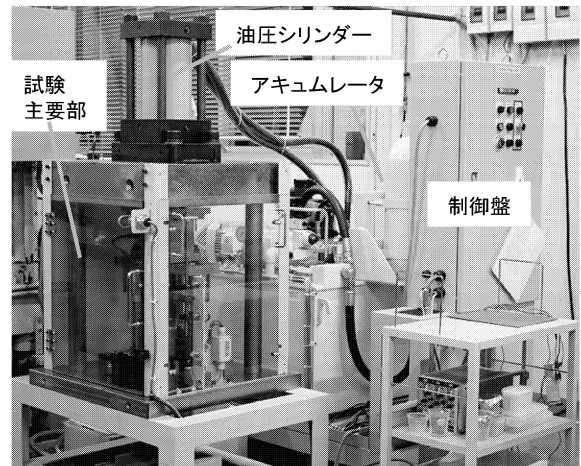


図8(a) 成形管内面しごき試験機

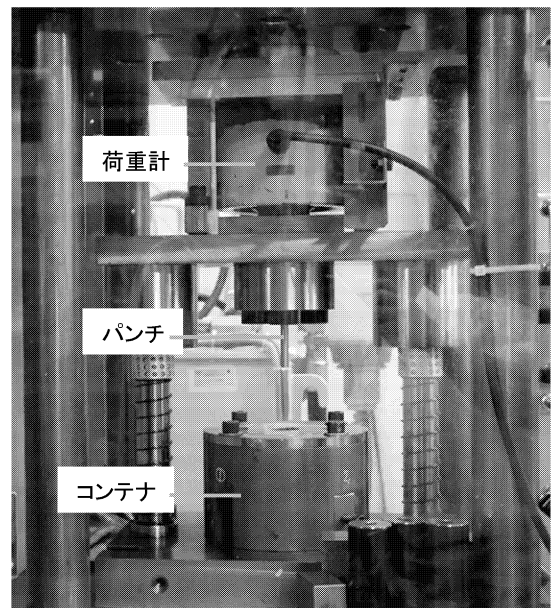


図8(b) 成形管内面しごき試験機の主要部

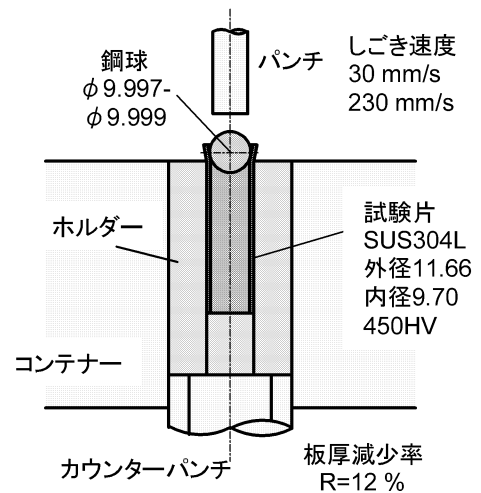


図8(c) 成形管内面しごき試験の原理

背面に配した荷重計で測定する。鋼球はSUJ2（焼入れ・焼戻し）で、軸受け用の鋼球を利用した。軸試験片は多段の絞り・しごき加工品の底を切断したものを利用した。内面粗さは約 $3\ \mu\text{m Rz}$ 、外径 $11.66\ \text{mm}$ 、内径 $9.70\ \text{mm}$ 、肉厚も $2\ \mu\text{m}$ オーダーのばらつきで試験条件に対して十分な精度である。また硬さは約 $450\text{HV}$ で、軸方向にも同様である。試験片の内面には供試潤滑油を塗付し、外面には共通に牛脂を塗付した。供試潤滑油としては粘度の異なるパラフィン系鉱油VG100, VG200, VG460および実機で試験したA, G, H, I, K, S1を用いた。

### 3・2 成形管内面しごき試験の結果

図9(a)に低速 ( $30\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )試験の代表的なしごき荷重-ストローク線図を示す。従来の塩素系Aはストローク初期に荷重が最大になり、その後少し減ってからほぼ一定か緩やかに減少する。硫黄系KはAより低い荷重であるが、変化の様子はAと同じように緩やかに減少気味である。無添加の鉱油VG200はストローク初期はKと同じくらいの荷重であるが、ストローク $s>10\ \text{mm}$ で荷重が25%ほど増加している。いずれの試験片も軽い擦り傷が見られた。同じ潤滑油について高速 ( $230\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )の試験結果を図9 (b)に示す。いずれの油剤についてもストローク初期の荷重の増加が緩やかである。ボールと材料との接触角も緩いため、しごき速度の増加に伴い、潤滑油が引き込まれやすくなった（くさび効果）ためと考えられる。ストローク後半にかけて、Aの荷重は低速試験の荷重より低い定常値を示し、試験片には軽く傷が付く程度で、低速の場合と差はない。Kは低速よりも荷重は少し高く、試験片表面にも深い傷が生じた。VG200はごく初期のストロークでは荷重が低めで、ここでも流体潤滑的なくさび効果が表れたと考えられるが、定常値をとらずにストロークの増加に連れて、荷重は増加する。 $s>15\ \text{mm}$ に対応する位置には激しいむしれ傷も発生していた。

他の潤滑油についても、しごき荷重や試験片内面傷の程度について調べ、図10に示す。ここでは、しごき速度低速 $v=30$ から高速 $v=230\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の変化に対する $s=20\ \text{mm}$ での荷重の増減や大きさを比較し、試験内面の傷の程度を模式的に示す。パラフィン系鉱油の荷重は、低速では粘度が増加するに連れて、荷重は増加しており、流体的な抵抗が荷重に反映することに対応する。しかし高速になると逆に低粘度の荷重が高く、試験片の表面には重かじりも観察され、重かじりの発生は、低粘度の鉱油ほど早くから始まっている。高速においては低粘度ほど油膜が破断しやすいと言える。無添加鉱油以外の潤滑油の荷重は、無添加鉱油より低く、高速でしごいても重かじりは発生していない。同粘度のVG200の荷重や傷の発生程度と比較しても焼付き防止に対して添加剤の効果が認められる。添加剤を含む潤滑油の間では荷重の差は小さく、部分的な焼付きは見られるが、いずれも傷の程度は軽い。無添加の鉱油にとって、 $R=12\%$ で高速しごきが厳しい条件であるように、添加剤配合油にとっては、さらに厳しい条件で試験する必要があると考えられる。

図11に減面率 $R=12, 16, 21\ \%$ の試験片内面の傷の発生位置と程度を詳細に模式的に示し、荷重の代表値（ストローク $20\ \text{mm}$ ）も併せて示す。 $R=12\%$ では2,3試験を追加して平均的な結果を載せたので、図10と本質的には変わらない。これらの結果から高速での性能差がより明確なので、 $R=16, 21\ \%$ について高速で試験した。 $R=16\%$ に

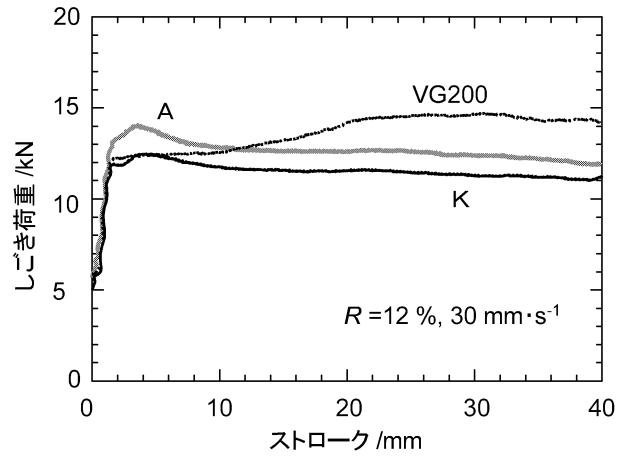


図9(a) しごき荷重-ストローク線図 ( $30\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

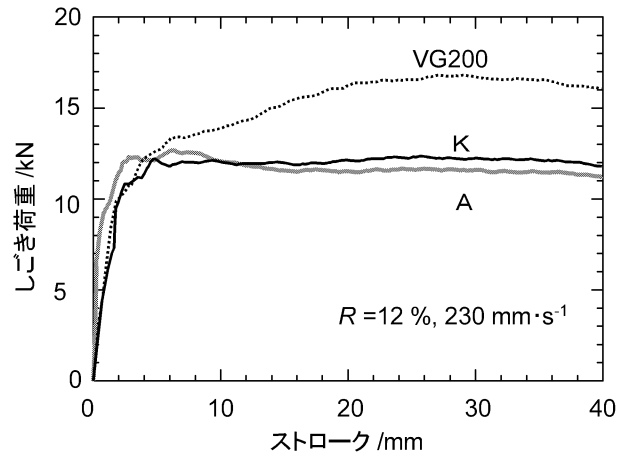


図9(b) しごき荷重-ストローク線図 ( $230\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

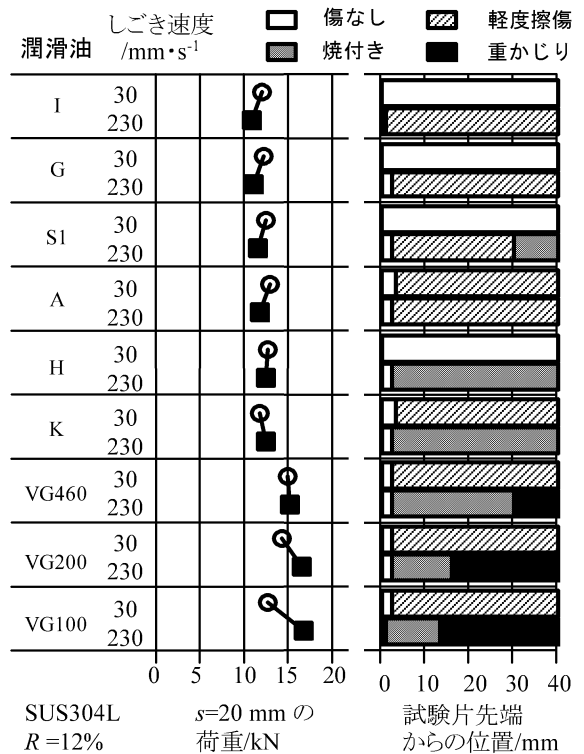


図10 試験潤滑油の荷重と試験片内面の傷の程度

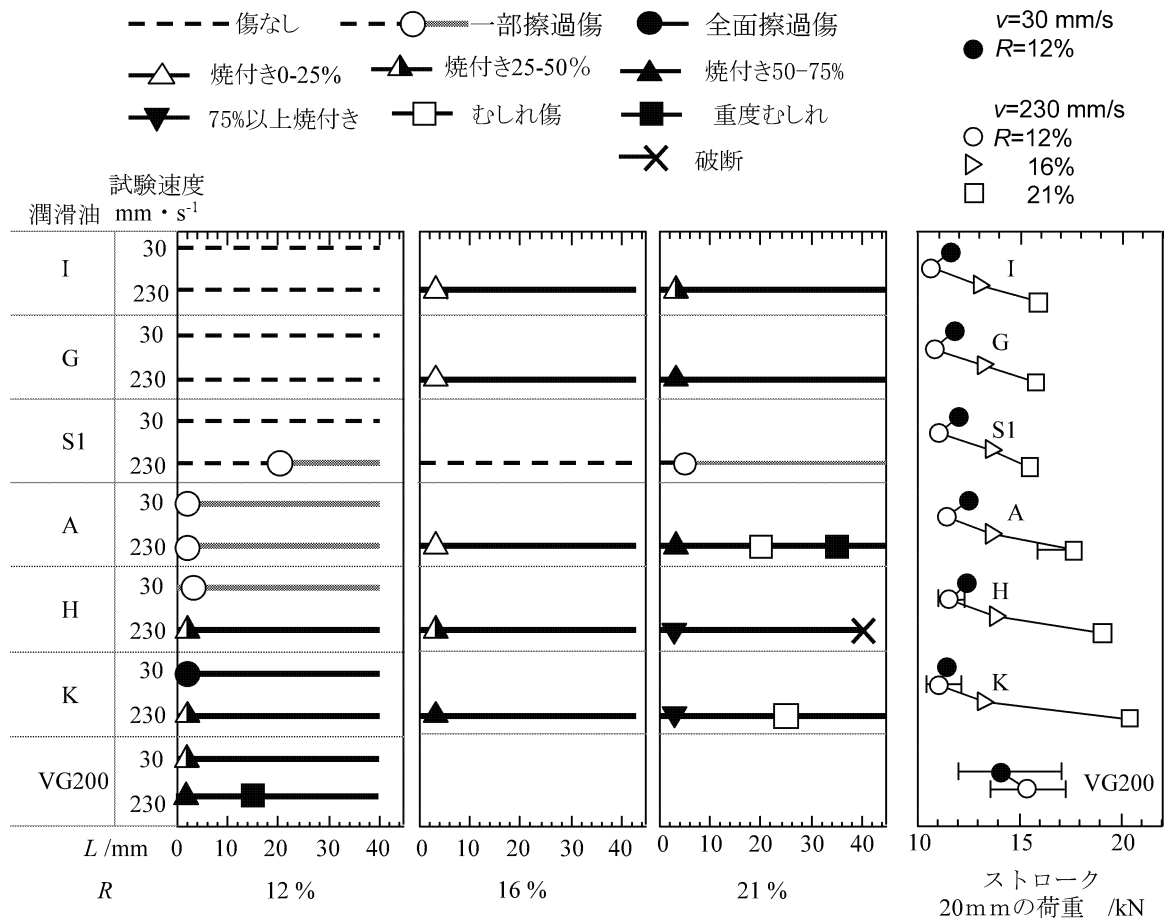


図11 減面率の増加に伴う表面傷の発生位置と程度，およびしごき荷重の比較

においてS1では傷がほとんどなく，I，G，Aについては軽度な焼付きがみられる．H，Kではそれより焼付き部分の割合が多い．この時点での荷重にはほとんど差がない． $R=21\%$ に上げると，S1で擦過傷が目立つようになり，I，Gでは擦過傷よりは深い焼付き傷が見られた．Aでは焼付きからむしれに発達した．Hはむしれは生じなかったが，最後に破断した．Kでは途中からむしれが始まった． $R=21\%$ の傷の様子から厳しい接触状態であったと推定されるものは，高い荷重を示した．試験片表面の傷の発生位置や程度は潤滑油の焼付き防止性能が反映していると見られる．また，初期的な傷や焼付きなど，軽度な潤滑膜破断の様子は荷重には反映されていないが，激しい焼付きなどの発生は荷重の増加と対応した．

無添加鈦油VG200や実機早期に焼付いたKの性能が最も低く，実用的に使用できる硫黄系のS1の性能が高く，G，Hがそれに次ぐ性能を示した点は，成形管内面しごき試験の結果とも対応している．しかし塩素系Aが $R=21\%$ で重度のむしれが発生する点は実機と対応していない．(実機試験当時の塩素系の油は短鎖の塩素系であったが，成形管内面しごき試験を実施するときには，既に製造中止になっており，入手できなかったため，現用の中鎖の塩素系潤滑剤で成形管内面しごき試験は実施した．) またIは実機では早期に焼付きが発生したが，成形管内面しごき試験では性能が比較的高いという点も対応していない．実機試験との条件の違いが影響したと思われる．たとえば，実機では多段連続加工なので，材料や工具の

温度が上がるが，成形管内面しごき試験では，その点は不十分と考えており，今後の課題としたい．

### 3・3 実機試験と成形管内面しごき試験における添加剤の反応性の比較

潤滑油にはいろいろな添加剤が含まれている．図7では，添加剤に主として含まれる硫黄と焼付き防止性能との比較を調べ，硫黄の反応活性と性能との相関が認められた．一方，潤滑油には他にもいろいろな添加剤が含まれているので，他の元素に起因する反応活性についても調べた．図12に実機と成形管内面しごき試験のEPMA分析結果を示す．今回は酸素，塩素，硫黄，カルシウム，ナトリウムについて分析した．X線強度比はこれらの反応活性に対応していると考えられる．また酸素の検出量が多いのは，反応生成物が酸化したことによると考えられる．どの元素ごとに比較しても，成形管内面しごき試験での反応量は実機に比べて少ないが，検出量の序列は両試験で対応している．このように総合的に反応活性を比べても，Kは反応量が少なく，性能も低い．Hは特に反応量が多いが，単純に性能とは対応していない．Hについて図10や図11の表面傷の程度から考えると，傷やある程度の発熱がある状態で結果として反応が促進した後の表面を分析していることも考えられ，このような場合には，今後の判定などに注意しなくてはならない．

図12の反応結果のうち塩素に起因するものを除いて，それ以外を単純に合計して，図13に再プロットした．実機試験と成形管内面しごき試験との反応量を比較すると，

実機試験の値が成形管内面しごき試験での値の5倍くらい高いが、両者のX線強度比の相関は強く、良い対応関係にある。これは添加剤の反応の観点からも、両試験の対応関係が良好であることを意味し、さらに実機試験のほうが潤滑条件的に厳しいことを示唆する結果といえる。成形管内面しごきは、実機試験ほど厳しくないが、各種添加剤やそれらの組合せの多くについて、第一次性能を経済的に、また手軽に判定できると考えられる。今後はこの試験機を活用して、添加剤の基本性能や潤滑メカニズムを検討する予定である。

#### 4. 結 言

塩素系油剤で従来行われたステンレス板の絞り・しごき加工に対して、硫黄系などの潤滑油を用いて実機試験を行い、さらにこれらの条件を考慮し、成形管内面しごき試験機を製作した。得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 実機試験では、材料は加工前170HVから最終段数で450HVという高い硬度を示し、面圧は相当に高いものと予測された。また最終段では表面粗さも小さく、微細な油溜りなども少なく、潤滑油の捕捉も厳しいと見られた。
- 2) 実機試験では、塩素系の油剤に比べて、硫黄系潤滑油の性能は低かったが、そのうちでも硫黄の反応活性が強いものほど、高い性能を示す傾向があった。
- 3) 高精度なステンレス鋼成形管を利用して、内面しごき試験機を製作した。その成形管内面しごき試験において、荷重と焼付き状況を観測したところ、実機試験と大体の評価結果について対応が取れていることが確認できた。
- 4) 反応活性の面から見て、実機試験の条件と成形管内面しごき試験とは対応関係が良好で、実機のほうがより厳しいと判断された。

今後は、今回製作した試験機を活用し、非塩素系として有望な硫黄系などの添加剤にや基油などの性能への影響などを調べ、さらに工具表面処理の効果などを調べ、良好な潤滑に必要な要件や潤滑のメカニズムの一部でも理解できるように努め、潤滑剤各社や表面処理各社などの開発促進に役立てたい。

謝辞 実機試験では株野口製作所に多大なるご協力を頂きましたこと、深く感謝申し上げます。また、出光興産(株)、新日本石油(株)、大同化学工業(株)、中京化成工業(株)、日本工作油(株)、ユシロ化学工業(株)からは快く潤滑油をご提供いただき、丁寧なご討議も頂きましたこと、深く感謝申し上げます。さらに表面分析は株豊田中央研究所の関係各位にもご協力、ご指導頂きましたこと、深く感謝申し上げます。名古屋工業大学の牧正幸君、森政樹君、神谷賢輝君、桂川雅人君、石川嘉信君、鈴木一孝君には、卒業研究を通じて、多くの実験・測定・観察に膨大な時間と大変な努力を頂きましたこと、深く感謝します。最後に、天田財団からは多くの本研究助成を頂き、試験機製作や実機試験など貴重な仕事を頂きましたこと、重ねて深く感謝いたします。

参考文献 1) 横田秀雄：塑性と加工、46-528 (2005), 11-14. 2) N. Bay etc.: Advanced Tech. Plasticity(2005), 621-622. 3) K. Kitamura etc.: Advanced Tech. Plasticity (1999), 875-880.

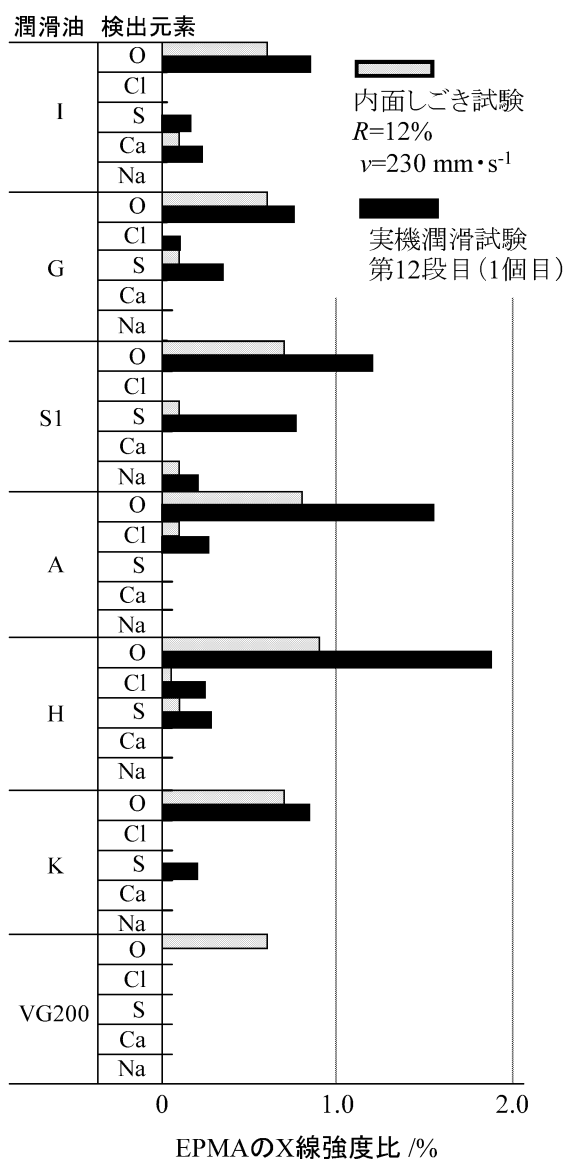


図12 試験片表面のEPMA分析

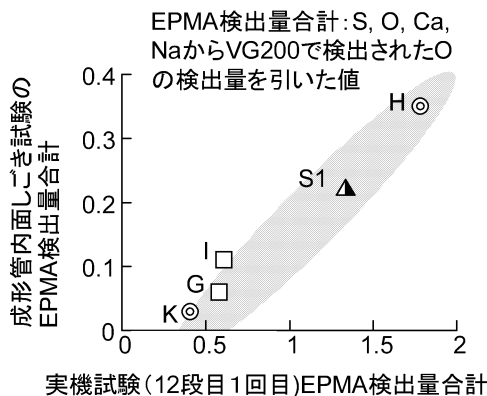


図13 実機と成形管内面しごき試験の総合的な反応量の比較